

Министерство образования и науки Российской Федерации
ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет-УПИ»

Ю.Н.Логинов, С.П.Буркин

ЭНЕРГОЕМКОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ПРОЦЕССАХ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СПЕЦИАЛЬНЫХ СПЛАВОВ

Методические указания к практическим занятиям и
самостоятельной работе по курсу "Технология пластической обработки
специальных сплавов", курсовому и дипломному проектированию для
студентов очно-заочной формы обучения
специальности 110600 - обработка металлов давлением

Екатеринбург
2006

УДК 669.1
ББК 34.621
Л69

Рецензент проф., к.т.н. В.В.Шимов

Ю.Н.Логинов, С.П.Буркин

Л69 Энергоемкость и энергосбережение в процессах пластической обработки специальных сплавов:

Методические указания к практическим занятиям и самостоятельной работе по курсу "Технология пластической обработки специальных сплавов", курсовому и дипломному проектированию для студентов всех видов обучения специальности 110600 – Обработка металлов давлением/ Ю.Н.Логинов, С.П.Буркин. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. 43 с.
ISBN 5-321-00500-1

Методические указания предназначены для выполнения расчетов энергоемкости процессов пластической деформации специальных сплавов и содержат рекомендуемые для анализа формулы и методики, примеры расчетов и задания для проведения самостоятельной работы.

Библиогр.: 30 назв. Табл.15. Рис. 4 . Прил. 5.

УДК 669.1
ББК 34.621

ISBN 5-321-00500-1

- © ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ», 2006
- © Логинов Юрий Николаевич, 2006
- © Буркин Сергей Павлович, 2006

СОДЕРЖАНИЕ

	С.
1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	4
2. ЭНЕРГОЕМКОСТЬ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК.....	4
3. ЭНЕРГОЕМКОСТЬ ХОЛОДНОЙ ЛИСТОВОЙ ПРОКАТКИ.....	6
4. РАСЧЕТ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ЛИСТОВЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ АЛЮМИНИЯ.....	9
5. ЭНЕРГОЕМКОСТЬ СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ.....	18
6. ЭНЕРГОЕМКОСТЬ ПРЕССОВАНИЯ.....	22
7. ЭНЕРГОЕМКОСТЬ ВОЛОЧЕНИЯ.....	27
8. СРАВНЕНИЕ ПО ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРОЦЕССОВ ГОРЯЧЕЙ И ХОЛОДНОЙ ДЕФОРМАЦИИ.....	29
9. ЭНЕРГОЕМКОСТЬ УПЛОТНЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ ЗАГОТОВОК.....	32
10. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ СОВМЕЩЕНИИ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ.....	34
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	37
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	39
Приложение 1. Удельный расход энергии при переплаве 1 т шихты.....	39
Приложение 2. Ориентировочные нормы трудоемкости, расхода металла и энергетических затрат на 1 т катанки на проволочно-прокатном стане.....	40
Приложение 3. Ориентировочные расходы топлива и КПД термических печей.....	41
Приложение 4. Удельный расход энергии на деформацию в процессах ковки и прокатки.....	42
Приложение 5. Отношение K фактического удельного расхода энергии на деформацию к теоретическому при различных способах обработки давлением.....	42

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Энергоемкость является одной из основных характеристик технологических процессов, т.к. энергетические затраты составляют ощутимую статью общих затрат на производство продукции. Особенно энергоемкими являются технологические процессы в обработке металлов давлением, где для осуществления процессов требуются значительные напряжения и усилия, моменты вращения рабочих органов машин и механизмов.

По физической сущности энергозатраты в обработке металлов давлением можно разделить на две большие группы: энергозатраты на собственно деформацию металла и энергозатраты на тот или иной вид нагрева металла. Последние нужны для того, чтобы нагреть металл для осуществления горячей деформации либо для того, чтобы осуществить термическую обработку металла для изменения его физических или механических свойств.

Решение задачи определения энергоемкости осложняется необходимостью знать доли энергии, полезно затраченной на проведение технологического процесса и энергии, рассеянной неэффективно. Различные технологические установки, как и различные технологии, обладают разными коэффициентами полезного действия, и, к сожалению, эти коэффициенты в расчетах можно задать приближенно, опираясь в лучшем случае на справочные данные, а в худшем случае на интуицию технолога или исследователя.

2. ЭНЕРГОЕМКОСТЬ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК

Энергоемкость нагрева зависит от теплофизических характеристик материала, массы заготовки и степени эффективности нагрева, оцениваемой коэффициентом полезного действия этого процесса.

Количество тепла, необходимого для нагрева заготовки массой m из материала с удельной теплоемкостью c от температуры t_2 до температуры t_1 , равно

$$Q^* = m \cdot c \cdot (t_1 - t_2). \quad (2.1)$$

Поскольку реальные процессы нагрева осуществляются с потерями тепла на нагрев футеровки печей, печной арматуры, окружающего воздуха, то для подсчета количества тепла Q , реально потребного на нагрев, следует учесть коэффициент полезного действия нагревательного устройства η , а для определения удельных энергозатрат Q_m (на единицу массы), следует правую и левую части равенства (2.1) разделить на массу m :

$$Q_m = \frac{Q^*}{m} = c \cdot (t_1 - t_2) / \eta. \quad (2.2)$$

Теплофизические характеристики некоторых металлов и сплавов представлены в табл. 1.

Таблица 1.1

Теплофизические характеристики металлов и сплавов [1]

Материал	Температура, °С	Плотность, кг/м ³	Теплоемкость, кДж/(кг*К)
Алюминий	0	2700	0,896
То же	400		0,980
Железо	0	7870	0,440
То же	1200		0,678
Золото	0	19300	0,130
Магний	0	1740	0,975
Никель	0	8900	0,427
То же	1200		0,531
Медь	0	8940	0,389
То же	800		0,423
Олово	0	7300	0,222
Платина	0	21450	0,131
Свинец	0	11340	0,127
Серебро	0	10490	0,233
Титан	0	4510	0,532
Цинк	0	7140	0,384
Тантал	0	16600	0,138
Малоуглеродистая сталь	100	7846	0,486
То же	1200	7495	0,682
Латунь Л63	20	8430	0,385
Бронза БрОЦ 4-3	20	8780	0,348
Константан МНМц40-1,5	20	8900	0,410
Нейзильбер МНЦ15-20	20	8800	0,394
Дюралюминий	20	2800	0,883
Нихром	20	8720	0,460

Задание 2.1. Подсчитать количество тепла, потребного для нагрева заготовки указанной массы от комнатной температуры до указанной температуры.

Таблица 2.1

Исходные данные для задания 2.1

Номер варианта	m , кг	Материал	t_1 , °C	η
1	10	Алюминий	400	0,9
2	50	Сталь	1200	0,5
3	100	Медь	800	0,6
4	200	Золото	700	0,7
5	10	Платина	1000	0,8
6	50	Дюралюминий	400	0,9
7	100	Тантал	800	0,7
8	200	Дюралюминий	350	0,6
9	10	Латунь Л63	700	0,6
10	50	Медь	700	0,7
11	100	Золото	600	0,8
12	200	Сталь	1100	0,8

3. ЭНЕРГОЕМКОСТЬ ХОЛОДНОЙ ЛИСТОВОЙ ПРОКАТКИ

Работа, необходимая для осуществления плоской прокатки, может быть оценена по формуле, рекомендованной в [3, с.252]:

$$A = p_{cp} \cdot B_1 \cdot h_1 \cdot L_1 \cdot \ln \lambda, \quad (3.1)$$

где p_{cp} - среднее удельное давление; B_1 , h_1 и L_1 - ширина, высота и длина прокатанной полосы; λ - коэффициент вытяжки.

В зависимости от условий прокатки (тонколистовая, толстолистовая, с натяжением или без него, со сплющиванием и т.д.) величина p_{cp} может вычисляться по различным методикам, например для плоской холодной прокатки в валках радиусом R без натяжения в [3, с.138] рекомендуется следующая формула:

$$p_{cp} = 1,15 \cdot \sigma_s \cdot \frac{2 \cdot h}{\Delta h \cdot (\delta - 1)} \left[\left(\frac{h_h}{h_1} \right)^\delta - 1 \right], \quad (3.2)$$

где σ_s - сопротивление деформации; Δh - обжатие; $\delta = 2 \cdot \mu \cdot l / \Delta h$; μ - коэффициент трения; $l = \sqrt{R \cdot \Delta h}$ - длина очага деформации;

$$h_n = h_1 \cdot \left\{ \frac{1 + \sqrt{1 + (\delta^2 - 1) \cdot \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^\delta}}{\delta + 1} \right\}^{\frac{1}{\delta}} - \text{высота очага деформации в}$$

нейтральном сечении.

При других условиях прокатки применяют более сложные формулы или методики, изложенные, например в [2,3].

Как правило, оценивают удельные затраты энергии на производство единицы продукции, например, одной тонны, обозначим такую характеристику A_m . Для ее расчета поделим левую и правую части равенства (3) на массу m , учтем также коэффициент полезного действия прокатки η_n , и получим

$$A_m = \frac{A}{m \cdot \eta_n} = \frac{p_{cp} \cdot \ln \lambda}{\rho \cdot \eta_n}, \quad (3.3)$$

где ρ - плотность материала.

Судя по справочным данным, расход электроэнергии на производство 1 т стального толстого листа составляет 80...90 кВт*ч/т (с учетом термообработки) [7, с.473], при получении тонколистовой продукции в рулонах 70...80 кВт*ч/т и 85...95 кВт*ч/т при поставке продукции в листах и полосах.

Пример 3.1. В качестве примера рассмотрим задачу оценки удельных энергозатрат при прокатке листа из алюминия марки А1 при следующих исходных данных: $h_0=8\text{мм}$; $h_1=6\text{мм}$; $R=180\text{мм}$, $\eta_n=0,8$.

Определяем $\Delta h=8-6=2\text{мм}$; $l=\sqrt{180 \cdot 2}=19,0\text{мм}$; по данным [3, с.230] при использовании в качестве смазки керосина $\mu=0,08$; $\delta=2 \cdot 0,08 \cdot 19,0/2=1,52$;

$$h_n = 6 \cdot \left\{ \frac{1 + \sqrt{1 + (1,52^2 - 1) \cdot \left(\frac{8}{6}\right)^{1,52}}}{1,52 + 1} \right\}^{\frac{1}{1,52}} = 6 \cdot 1,0566 = 6,34\text{мм}.$$

Сопротивление деформации определим по кривой упрочнения для алюминия марки А1, приведенной в [3, с.134]

$$\sigma_{sk} = 60 + 6,4 \cdot \varepsilon^{0,62};$$

$\varepsilon=100 \cdot 2/8=25\%$; $\sigma_{sk} = 60 + 6,4 \cdot 25^{0,62}=107,1\text{МПа}$; среднее за проход значение $\sigma_s = (60 + 107,1)/2 = 83,55\text{МПа}$;

$$p_{cp} = 1,15 \cdot 83,55 \cdot \frac{2 \cdot 6,34}{2 \cdot (1,52 - 1)} \left[1,0566^{1,52} - 1 \right] = 1,223 \cdot 83,55 = 102,3 \text{ МПа},$$

$$\lambda = h_0/h_1 = 8/6 = 1,333; \rho = 2700 \text{ кг/м}^3.$$

$$A_m = \frac{102,3 \text{ МПа} \cdot \ln 1,333}{2700 \text{ кг/м}^3 \cdot 0,8} = \frac{0,010874}{0,8} \cdot \frac{10^6}{3600} = 3,775 \text{ кВт*ч/т}.$$

Задание 3.1. Рассчитать энергоемкость процесса плоской холодной прокатки предварительно отожженной полосы при указанных в табл. 3.1 условиях и $\eta_{II} = 0,8$.

Таблица 3.1

Исходные данные для задания 3.1

Номер варианта	Материал	h_0 , мм	h_1 , мм	R , мм	μ
1	Алюминий А1	14	11	200	0,1
2	Медь М1	4	3	150	0,2
3	Сталь Ст3	5	4	130	0,1
4	Латунь Л63	4,5	4,0	90	0,1
5	Титан ВТ1	5	5,2	80	0,15
6	Дюралюминий Д1	3	2,5	80	0,15
7	Медь М1	5	3,9	80	0,2
8	Мельхиор МН19	4	3	70	0,1
9	Сталь Ст3	6	4,8	130	0,1
10	Алюминий А1	7	6	200	0,1
11	Сталь 45	4	3,2	140	0,07
12	Сталь У8А	5	4,4	120	0,08

4. РАСЧЕТ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ЛИСТОВЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ АЛЮМИНИЯ

Горячая прокатка алюминия и его сплавов является достаточно энергоемким процессом, поэтому естественно стремление технологов снизить затраты энергии и тем самым улучшить технико-экономические показатели производства.

- **Возможные методики расчета**

Для анализа энергетических затрат используют несколько вариантов расчета, некоторые из которых будут проанализированы ниже.

1. «Экономический» вариант. Суммируется установленная паспортная мощность оборудования, установленного на данном производстве, умножается на часовой фонд работы оборудования. Полученная энергия делится на массу произведенной продукции. Этот вариант часто является базовым в экономических расчетах. Метод крайне не точен, поскольку установленная мощность в реальных процессах работы механических систем и тепловых агрегатах никогда не используется полностью. При установленной мощности привода прокатного стана в 100кВт потребная мощность в отдельных проходах может составлять доли процента. То же относится и к работе тепловых агрегатов.
2. «Эмпирический» вариант. Измеряется расход энергии в целом по производству или цеху. Расход делится на количество произведенной продукции. Метод плохо подходит к анализу работы предприятий цветной металлургии, в которых сортамент продукции очень большой и переход с одного типа полуфабрикатов на другой может осуществляться в течение одной смены несколько раз. Возможно применение метода для отдельно стоящего агрегата, например, прокатного стана или нагревательного устройства, но в реальных условиях, как правило, на агрегатах не установлены измерители потребляемой мощности или энергии.
3. «Теоретический» вариант. С позиций физики процесса оцениваются затраты энергии на нагрев или осуществление работы деформации. Несовершенство оборудования и технологии оценивается коэффициентом полезного действия(КПД). Точность метода определяется знанием реального КПД устройства. Метод хорош тем, что он не зависит от субъективных факторов при потерях энергии из-за низкой дисциплины производства, а отражает физическую сущность явлений. Именно поэтому он выбран в качестве базового для проведения анализа.

Рассмотрим реальную ситуацию, возникающую при прокатке слитка размерами 258x1080x1700мм из технически чистого алюминия на полосу толщиной 6 мм.

Ширина и длина слитка заданы только лишь для того, чтобы была возможность оценить конфигурацию очага деформации, поскольку в дальнейшем будем пользоваться относительными показателями.

- Энергоемкость нагрева слитков

Количество тепла Q , необходимое для нагрева заготовки массой m из материала с удельной теплоемкостью c от температуры t_2 до температуры t_1 , равно

$$Q = m \cdot c \cdot (t_1 - t_2). \quad (4.1)$$

Поскольку реальные процессы нагрева осуществляются с потерями тепла на нагрев футеровки печей, печной арматуры, и с теплоотдачей в окружающее пространство, то в расчетах следует учесть коэффициент полезного действия (КПД) установки η_Q . Удобнее также пользоваться удельными показателями, в качестве которого используем показатель затрат тепла $Q_{уд}$ на тонну перерабатываемого материала, тогда

$$Q_{уд} = 100 \cdot Q^* / (m \cdot \eta_Q) = 100 \cdot c \cdot (t_1 - t_2) / \eta_Q. \quad (4.2)$$

Важным вопросом является назначение КПД печи, адекватно отражающего потери при нагреве. В источнике [16] утверждается, что КПД методической электрической печи, в которой обычно производят нагрев плоских слитков, составляет величину 75%. Однако в источнике [2] утверждается, что на нагрев алюминиевых заготовок в индукторе требуется 280 кВт*ч/т, а на нагрев в методической печи сопротивления потребуется 470 кВт*ч/т.

Таким образом, если за 100% взять КПД индукционного нагрева, то КПД нагрева в методической конвейерной печи сопротивления составит только 59% относительно КПД индуктора. При этом надо учесть, что КПД индуктора тоже не равен 100%.

При теплоемкости алюминия $c=0,896$ МДж/(т*град), КПД нагрева 100% и нагреве слитка до температуры $t_1=480^\circ\text{C}$, расчет по формуле (2) приводит к значению $Q_{уд}=340$ МДж/т или 95 кВт*час/т. Тогда КПД нагрева в индукторе составит 34%, а в методической конвейерной печи сопротивления 20%. Такой низкий КПД обусловлен необходимостью непрерывного нагрева и последующего охлаждения конвейера, имеющего большую массу.

При нагреве алюминиевых слитков в методической конвейерной печи сопротивления расчет по формуле (2) с КПД=20% приводит к величине затрат на нагрев слитков 473 кВт*ч/т. В справочнике [15] приведены практические затраты энергии на нагрев и расплавление алюминия, которые составляют 480 кВт*час/т. Естественно, что условия нагрева несколько различны, поскольку температура литья алюминия и его сплавов выше, чем температура прокатки, но значительно выше и КПД печи (по данным [15] 69%). В целом, затраты на нагрев алюминиевых слитков под прокатку оказались соизмеримыми с затратами энергии на плавку и литье.

- Энергоемкость формоизменения металла

Работа стана горячей прокатки связана с затратами энергии на деформацию и затратами энергии на обеспечение работы многочисленных механизмов, обслуживающих стан. Однако самым мощным потребителем энергии при этом остается главный привод стана. Поэтому оценим энергозатраты на процесс прокатки с позиций необходимости совершения работы деформации, остальные затраты энергии оценим КПД установки.

Возможен анализ ситуации с позиции достижения конечного результата: перевода формы заготовки в виде слитка в форму готового проката в виде горячекатаной полосы. Работа пластической деформации при плоской прокатке в отсутствие трения и дополнительных сдвигов может быть оценена выражением

$$A^{\text{ч}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot V \cdot \ln \frac{h_0}{h_k}, \quad (4.3)$$

где σ_s – сопротивление деформации; V – объем слитка; h_0 и h_k – толщина слитка и готовой полосы соответственно.

На совершение работы пластической деформации единицы массы m заготовки, изготовленной из материала плотностью ρ , потребуется энергия, назовем ее «чистой работой деформации»:

$$A_{\text{уд}}^{\text{ч}} = \frac{A^{\text{ч}}}{m} = \frac{A^{\text{ч}}}{V \cdot \rho} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sigma_s}{\rho} \cdot \ln \frac{h_0}{h_k}. \quad (4.4)$$

Допустим, что прокатка является изотермическим процессом, среда является идеально пластичной, тогда $\sigma_s = \text{const}$. Среднее сопротивление деформации технически чистого алюминия оценим формулой

$$\sigma_s = a \cdot \sigma_{s0} \cdot \varepsilon^{m1} \xi^{m2} \cdot e^{-m3 \cdot t_1}, \quad (4.5)$$

где $m1, m2, m3$ – эмпирические коэффициенты; ε – логарифмическая степень деформации; ξ – скорость деформации; σ_{s0} – базовое значение.

Для технически чистого алюминия [2] $m1=0,173$; $m2=0,111$; $m3= -0,00396$; $a=5,63$; $\sigma_{s0}=38$ МПа. Расчеты показали, что в течение процесса прокатки в реальных условиях производства усредненное значение сопротивления деформации составляет 30 МПа. При применении формулы (4.4) получим значение $A_{\text{уд}}^{\text{ч}}=42$ МДж/т или 12 кВт*ч/т.

- Энергоемкость горячей прокатки

По данным [2] расход энергии на горячую плоскую прокатку алюминия составляет 112 кВт*ч/т. Таким образом, КПД горячей прокатки составляет 11%. Такое низкое значение КПД требует самостоятельного анализа.

Как известно, прокатка характеризуется дополнительными энергетическими затратами на преодоление сдвигов на границе с жесткими зонами и преодоление напряжений трения на контактной поверхности. Для оценки этого фактора ниже представлен расчет энергозатрат в каждом проходе прокатки по маршруту 258-240-222-204-186-156-126-96-66-36-17-6мм. Прокатка производится на стане с диаметром рабочих валков 700 мм и скоростью прокатки 0,4...1м/с.

Энергозатраты за каждый проход прокатки без учета дополнительных сдвигов и трения на контактной поверхности определим по формуле, аналогичной (4):

$$A_{уд}^ч = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sigma_{si}}{\rho} \cdot \ln \frac{h_{i-1}}{h_i}, \quad (4.6)$$

где $i = 1, 2, \dots, 11$ – номер прохода.

Энергозатраты за каждый проход прокатки с учетом дополнительных сдвигов и трения на контактной поверхности определяются по формуле, рекомендованной [3]

$$A_i^п = p_{cp} \cdot V_i \cdot \ln \frac{h_{i-1}}{h_i}, \quad (4.7)$$

где p_{cp} – среднее удельное давление прокатки.

Удельные энергозатраты (на единицу массы) определяются как

$$A_{уд}^п = \frac{p_{cpi}}{\rho} \cdot \ln \frac{h_{i-1}}{h_i}. \quad (4.8)$$

Среднее удельное давление прокатки определим по известным формулам [3,4,23]

$$p_{cpi} = 1,15 \cdot \sigma_{si} \cdot n_{\sigma i}; \quad (4.9)$$

$$n_{\sigma i} = \left(\frac{l_i}{h_{cpi}}\right)^{-0,4} \text{ при } \frac{l_i}{h_{cpi}} < 1; \quad (4.10)$$

$$n_{\sigma i} = 1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{l}{h_{cpi}} \text{ при } 1 < \frac{l_i}{h_{cpi}} < 2; \quad (4.11)$$

$$n_{\sigma i} = \frac{2h_{ni}}{\Delta h_i \cdot (\delta_i - 1)} \cdot \left[\left(\frac{h_{ni}}{h_{1i}}\right)^{\delta_i} - 1 \right] \text{ при } 2 < \frac{l_i}{h_{cpi}} < 4, \quad (4.12)$$

$$n_{\sigma i} = 1 + \frac{1}{4} \cdot \frac{l}{h_{cpi}} \text{ при } \frac{l_i}{h_{cpi}} > 4; \quad (4.13)$$

где $\frac{l_i}{h_{cpi}}$ - текущее(по проходам) отношение длины очага деформации l_i к средней толщине проката; $l_i = \sqrt{(D/2) \cdot \Delta h_i}$ - длина очага деформации; μ_i , D и Δh_i - коэффициент трения, диаметр валка и обжатие; h_{ni} - высота очага деформации в нейтральном сечении; $\delta_i = \frac{2 \cdot \mu_i \cdot l_i}{\Delta h_i}$ - параметр.

По данным [24] при горячей прокатке алюминия коэффициент трения является функцией параметра l/h , температуры и скорости прокатки. При характерной для промышленных условий скорости прокатки около 1 м/с и температуре 400°C по данным, приведенным в [24], рассчитаны коэффициенты трения при скорости прокатки 1 м/с и приведены на графике рис.4.1 в виде опытных точек. С коэффициентом корреляции 0,9 уравнение регрессии при указанных условиях прокатки имеет вид

$$\mu = -0,013 \left(\frac{l}{h_{cpi}} \right)^2 + 0,074 \frac{l}{h_{cpi}} + 0,2042 \quad (4.14)$$

Линия регрессии по формуле (4.14) построена на графике рис.4.1, эти данные использованы в расчетах по приведенным выше формулам.

Как показали расчеты при заданном режиме обжатий, параметр $\frac{l}{h_{cp}}$ изменяется от 0,3 до 5,4 и перекрывает все указанные выше диапазоны. Суммарный расход энергии на прокатку, полученный по результатам суммирования расходов энергии по проходам составил 49 кВт*час/т.

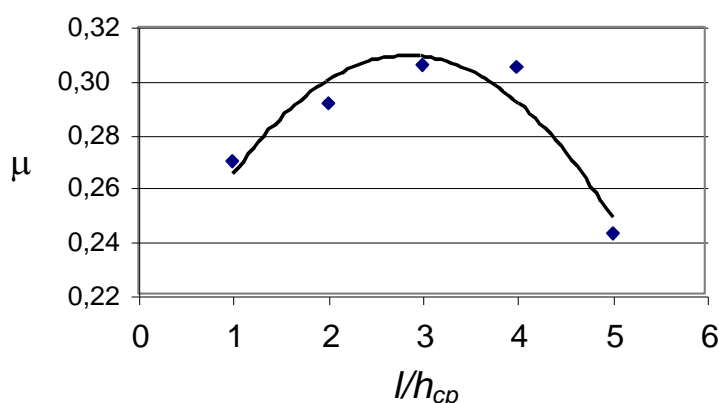


Рис.4.1. Зависимость коэффициента трения при прокатке алюминия от параметра l/h_{cp} при 400°C и скорости прокатки 1м/с

- Анализ КПД прокатки

Введем понятие КПД прокатки в каждом проходе η_{pi} как выраженное в процентах отношение затрат энергии только на изменение формы $A_i^ч$ к общим

затратам энергии в проходе $A_i^п$: $\eta_{pi} = 100 \cdot \frac{A_i^ч}{A_i^п}$. Это отношение позволяет оценить долю полезно совершенной работы.

В качестве аргумента этой функции удобно применить параметр $\frac{l}{h_{cp}}$. По ходу прокатки этот параметр непрерывно увеличивается, т.к. очаг деформации становится все ниже. Как видно из рис.4.2, КПД процесса имеет максимум при параметре $l/h=1$, что согласуется с представлением, что при этой координате нормальные напряжения прокатки достигают минимума.

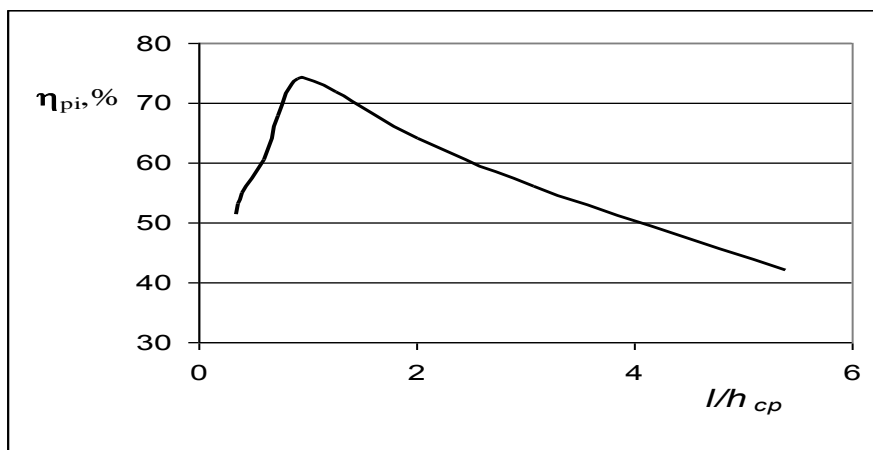


Рис.4.2. Зависимость КПД прокатки от параметра l/h , для условий примера ситуация по проходам изменяется слева направо

Наибольшее количество проходов горячей прокатки осуществляется при значениях параметра $\frac{l}{h_{cp}} < 1$. Как видно из графика, значение КПД процесса в этой области изменяется от 50 до 75%. Кроме совершения полезной работы формоизменения энергия в этом диапазоне тратится на преодоление сопротивления жестких зон. Величину КПД можно повысить за счет повышения обжатий, тогда параметр $\frac{l}{h_{cp}}$ также увеличится и доля полезно затрачиваемой энергии возрастет. Однако увеличению обжатий препятствуют условия захвата и возможная перегрузка привода стана.

Поэтому актуальным вопросом является создание условий улучшения захвата и одновременное снижение энергосиловых параметров прокатки. Эта задача может быть решена применением мощных заталкивающих устройств, переводящих режим прокатки частично в режим прессования через валковую

матрицу. Этот вариант частично осуществляется при вводе в эксплуатацию новых прокатных станов.

Вторым возможным вариантом повышения КПД процесса прокатки является отказ от применения высоких слитков. Действительно, одной из целей горячей прокатки является проработка структуры литого металла, однако при прокатке слишком высоких слитков эта задача не решается, поскольку центральная часть слитка в первых проходах прокатки не прорабатывается. Только после перехода к слиткам умеренной высоты такая проработка имеет место, но может быть стоит рассмотреть вопрос о том, что не стоит тратить понапрасну энергию при прокатке, а отлить сразу слиток умеренной высоты.

Ранее в нашей стране наблюдалась тенденция увеличивать всячески развес слитков, что приводило к повышению производительности как прокатного, так и литейного оборудования. Сейчас в стране имеется много резервных мощностей и на первый план вышли другие приоритеты. Например, вместо задачи обеспечения наивысшей производительности можно и нужно решать задачи экономии энергоресурсов.

Правая ниспадающая ветвь графика рис.3 относится к случаю прокатки заготовок умеренной высоты и даже тонких листов. Ощутимое снижение КПД прокатки алюминия(до 40%) здесь связано с увеличением влияния напряжений трения на контактной поверхности. Лишние затраты энергии на преодоление трения усугубляются высокими значениями коэффициента трения, по разным данным он составляет величину 0,25...0,44 в зависимости от условий прокатки [24]. Значительные напряжения трения и опасность налипания алюминия на валки заставляют применять в большом объеме смазочно-охлаждающие жидкости(СОЖ), которые позволяют довести прокатку до необходимого результата[25], но в то же время охлаждение полосы приводит к невозможности прокатки тонких полос в режиме горячей деформации. С точки зрения экономии энергозатрат, применение СОЖ крайне не оправданно, потому что накопленное СОЖ тепло, как правило, не утилизируется и пропадает зря.

Судя по графику рис.4.3, повысить КПД на этой стадии процесса можно было бы применением валков, у которых диаметр соответствовал бы длине очага деформации для фиксации параметра $\frac{l}{h_{cp}}$ около 1. Однако такой вариант

осуществим только при применении стана непрерывной прокатки.

Сравним энергозатраты на процесс горячей прокатки алюминиевых листов:

- «чистая» работа изменения формы $12 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$;
- по данным расчета энергосиловых параметров прокатки с учетом влияния жестких зон и трения $49 \text{ кВт}\cdot\text{час/т}$;
- по данным [2] энергия на прокатку в цеховых условиях $112 \text{ кВт}\cdot\text{час/т}$.

Разница в значениях расхода энергии обусловлена следующими причинами. В приведенных в данной работе расчетах не учтены потери энергии на преодоление динамических нагрузок, связанных с разгоном и реверсом стана и рольгангов. Не учтена также работа вспомогательного оборудования стана горячей прокатки (линейки, кантователи, подъемные столы, рольганги и др.).

На рис.4.4 приведена гистограмма энергозатрат на горячую прокатку алюминия. Наиболее затратным процессом является нагрев заготовок. Собственно прокатка потребляет в четыре раза меньше энергии, чем нагрев.

На чистую работу изменения формы заготовки, т.е. собственно на то, на что направлен процесс прокатки, тратится около 10% энергии. При этом затраченная энергия практически не утилизируется.

Естественно, что менее затратными являются схемы получения

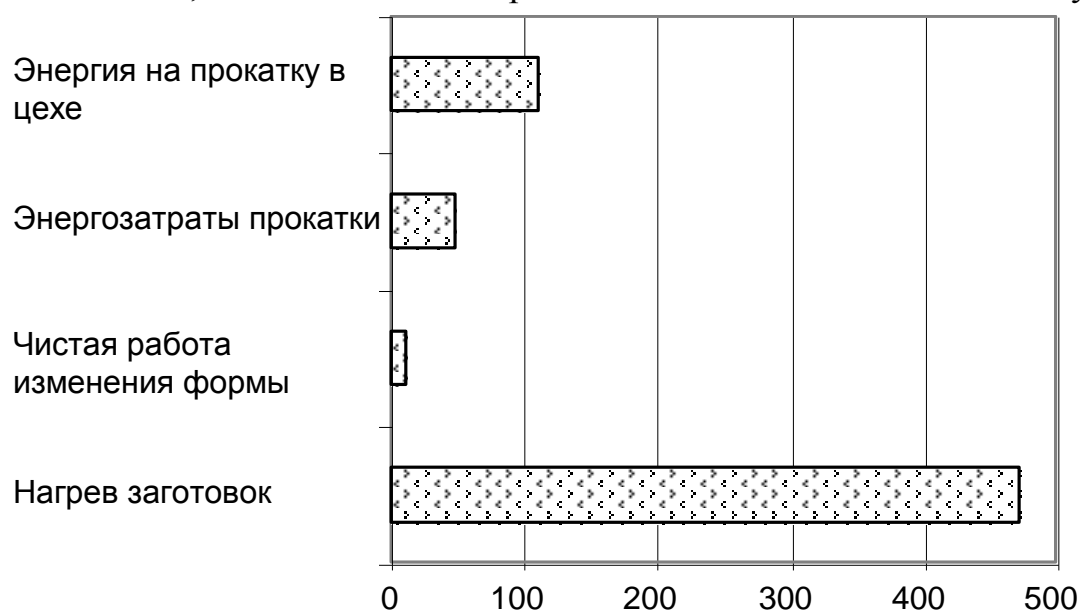


Рис.4.4. Энергетические затраты на процесс горячей прокатки алюминия (кВт*ч/т)

горячекатанного алюминиевого листа на установках непрерывного литья и прокатки. При этом экономится энергия, необходимая на нагрев под горячую прокатку. Кроме того, обычно отливается заготовка гораздо меньшей толщины, чем толщина традиционного сляба. Поэтому конфигурация очага деформации при последующей прокатке становится более оптимальной с точки зрения минимизации энергозатрат.

Еще одним вариантом экономии затрат является литье относительно тонкой заготовки и последующая холодная прокатка без применения горячей

прокатки. Энергетические затраты на такой передел окажутся значительно меньше, чем на передел, включающий горячую деформацию, что показано на примере прессования в статье[26].

Однако такая технологическая схема приемлема для случая деформации только такого пластичного материала, каким является алюминий и поэтому не обладает универсальностью. При холодной прокатке заготовок из алюминиевых сплавов много энергии будет расходоваться на рекристаллизационные отжиги и схема станет нерентабельной. Следует учесть, что при производстве листовой продукции из сплавов алюминия необходим также учет изменения структуры и фазового состава материалов.

Таким образом, существующий процесс горячей прокатки алюминиевых заготовок обладает невысоким коэффициентом полезного действия. Наиболее энергетически затратным является нагрев заготовок, особенно при использовании методических конвейерных печей. КПД процесса нагрева можно увеличить за счет изменения способа нагрева.

При горячей прокатке низкие значения КПД процесса наблюдаются при отклонении параметра формы $\frac{l}{h_{cp}}$ от единицы. Поэтому необходима разработка мер, направленных на оптимизацию формы очага деформации. Эта задача может быть решена применением иной конфигурации прокатных станов, более тонких слитков и переходом в режим холодной деформации.

5. ЭНЕРГОЕМКОСТЬ СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ

Расчет энергоемкости сортовой прокатки затруднен необходимостью определения формоизменения на каждом проходе прокатки, что, главным образом, зависит от выбранной системы калибровки валков. При расчете калибровки по известным методикам[5,6] обычно определяют также необходимые для прокатки усилия, моменты и мощности, а также отслеживают температурный режим прокатки. На основании этих данных возможно рассчитать энергоемкость процесса.

Следует отметить одну особенность сортовой прокатки как разновидности обработки давлением: здесь часть энергии расходуется "зря" на процесс уширения заготовки в проходах. В каждом последующем проходе этот металл, пошедший на уширение, вновь пытаются перевести в удлинение, но часть металла опять уходит в уширение и т.д. Различные калибровки валков позволяют по-разному перераспределять течение металла в удлинение и уширение, и поэтому говорят о вытяжной способности калибров: чем она выше, тем меньше металл впустую перегоняется в уширение и обратно и, на первый взгляд в этом случае меньше энергозатраты. Однако при высокой вытяжной способности калибра (например, при использовании закрытых калибров) могут значительно возрастать напряжения в очаге деформации и это может привести к росту энергозатрат.

При известной мощности прокатки N и скорости прокатки n (об/мин) возможно рассчитать работу процесса, поскольку

$$A = N \cdot t = N \cdot \frac{L_1}{v}, \quad (5.1)$$

где t - время прокатки; L_1 - длина полосы; $v = \frac{\pi \cdot n \cdot R}{30}$ - линейная скорость.

В некоторых изданиях [2] удельную работу деформации оценивают на единицу объема заготовки $V = F_1 \cdot L_1$, применяя размерность Дж/мм³, обозначим эту величину A_v , поделим правую и левую части равенства (5.1) на объем, учтем коэффициент полезного действия процесса $\eta_{\text{п}}$ и получим

$$A_v = \frac{A}{V \cdot \eta_{\text{п}}} = \frac{N \cdot L_1 \cdot 30}{\pi \cdot R \cdot n \cdot L_1 \cdot F_1 \cdot \eta_{\text{п}}} = \frac{30 \cdot N}{\pi \cdot R \cdot n \cdot F_1 \cdot \eta_{\text{п}}}, \quad (5.2)$$

где F_1 - площадь поперечного сечения полосы.

Для оценки работы деформации, отнесенной на единицу массы заготовки A_m , разделим левую и правую части равенства (5.2) на плотность ρ , получим

$$A_m = \frac{30 \cdot N}{\pi \cdot R \cdot n \cdot F_1 \cdot \eta_{\text{п}} \cdot \rho}. \quad (5.3)$$

Пример 5.1. В качестве примера рассмотрим процесс прокатки круглой стали диаметром 20 мм из заготовки диаметром 45 мм на прокатном блоке 200, формоизменение и энергосиловые параметры для которого уже рассчитаны и являются исходными данными (табл.4.1). Условно примем $\eta_{\text{п}}=1$.

А.Хензель и Т.Шпиттель [2] предложили строить диаграммы, отражающие энергозатраты на процесс сортовой прокатки, в виде графиков, где по оси абсцисс отложена суммарная логарифмическая деформация, а по оси ординат - накопленная работа. Ход графика помогает выявить оптимальные с точки зрения минимума энергозатрат калибровки. Поэтому в дополнение к данным табл.5.1 рассчитаем суммарную логарифмическую вытяжку по проходам (табл.5.2):

$$\varepsilon_{i\Sigma} = \sum_1^i \ln \lambda_i. \quad (5.4)$$

Формула (5.4) позволяет оценить вклад каждого из проходов прокатки в формирование общих энергозатрат.

Таблица 5.1

Параметры прокатки круглого прутка из стали Ст3 диаметром 20 мм из заготовки диаметром 45мм при температуре 1200°C

№про- хода	Форма и размеры полосы	Площадь сечения, мм ²	Вытяжка	Момент, кНм	Мощность, кВт	Скорость, об/мин
0	Круг 45	1590,431				
1	Овал 28,0х52,2	1190	1,34	6,63	29,5	42,4
2	Овал 41,0х32,8	1012	1,174	2,11	11,4	51,3
3	Овал 22,0х45,7	800	1,264	3,57	23,2	62,2
4	Овал 33,0х26,4	650	1,234	2,52	20,7	78,6
5	Овал 19,5х34,5	555	1,174	1,87	17,5	89,3
6	Круг 23,8	444	1,25	1,76	26,3	142,7
7	Овал 17,8х25,8	368	1,21	1,70	30,2	169,3
8	Круг 20	314	1,17	0,89	18,7	200

Таблица 5.2

Удельные затраты энергии на процесс прокатки

№про- хода	Суммарная логарифмичес- кая вытяжка	Удельные энергозатраты		Удельные энергозатраты нарастающим итогом	
		Дж/см ³	кВт*ч/т	Дж/см ³	кВт*ч/т
0					
1	0,29	55,8	1,99	55,8	1,98
2	0,45	21,0	0,74	76,8	2,73
3	0,69	44,5	1,58	121,3	4,32
4	0,89	38,7	1,37	160,0	5,70
5	1,05	33,7	1,20	193,7	6,90
6	1,28	39,6	1,41	233,4	8,31
7	1,46	46,3	1,64	279,7	9,96
8	1,62	28,4	1,01	308,1	10,97

Воспользуемся формулами (5.2) и (5.3) и рассчитаем удельные энергозатраты в Дж/см³ и в кВт*ч/т по проходам прокатки, а также рассчитаем суммарные энергозатраты нарастающим итогом по проходам, используя формулу

$$A_{i\Sigma} = \sum_{1}^i A_i . \quad (5.5)$$

На рис.5.1 отражена зависимость последнего параметра от накопленной логарифмической деформации.

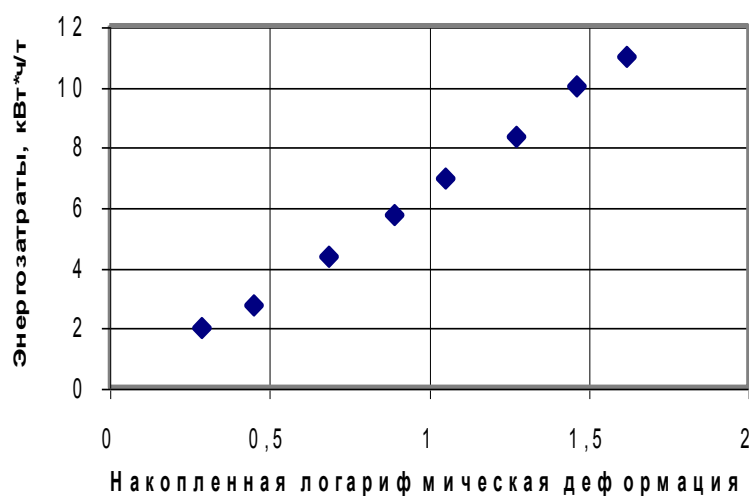


Рис.5.1. Зависимость удельных энергозатрат от накопленной логарифмической деформации

График рис.5.1 позволяет оценить энергоемкость отдельных проходов прокатки, а также суммарную энергоемкость передела.

В литературе [7,с.353] приводятся данные об удельном расходе электроэнергии на производство сортовой стали: для среднесортного стана 300-350 - 126 МДж/т (35 кВт*ч/т), для мелкосортного стана 250 - 180 МДж/т (50 кВт*ч/т), для проволочного стана 252 МДж/т (70 кВт*ч/т).

Данные по энергоемкости сортовой прокатки цветных металлов приведены в приложении 1.

Следует отметить, что на энергоемкость сортовой прокатки может оказывать большое количество факторов, не учитываемых при анализе только формоизменения в калибрах. Такая операция как кантовка полосы между отдельными проходами может быть проведена с довольно большими затратами на трение в проводках и скручивание полосы в межклетевом промежутке. Но эти действия могут быть выполнены и с минимальными затратами: разворот клеток, а не полосы, применение проводок качения, а не скольжения и т.д. При работе заготовительных клеток сортопрокатных станов тратится дополнительная энергия на работу подъемно-качающихся столов, привод рольгангов и привалковой арматуры, устройств гидросбива и т.д..

Задание 5.1. Рассчитать энергоемкость процесса получения указанного полуфабриката методом сортовой прокатки. Параметры стана выбрать самостоятельно. Предварительно рассчитать калибровку валков.

Таблица 5.3

Варианты заданий

Вариант	Материал	Полуфабрикат	Заготовка
1	Латунь Л63	Круг 30мм	Круг 100мм
2	Титан ВТ1	Круг 25мм	Круг 90мм
3	Дюралюминий Д1	Круг 20мм	Круг 60мм
4	Медь М1	Прямоугольник 30х10мм	Квадрат 60мм
5	Мельхиор МН19	Круг 20мм	Круг 90мм
6	Сталь Ст3	Круг 12мм	Квадрат 80мм
7	Алюминий А1	Круг 8мм	Круг 30мм
8	Латунь Л63	Круг 30мм	Круг 80мм
9	Титан ВТ1	Круг 25мм	Круг 60мм
10	Дюралюминий Д1	Круг 20мм	Круг 80мм
11	Медь М1	Прямоугольник 20х10мм	Квадрат 80мм
12	Мельхиор МН19	Круг 20мм	Круг 60мм

6. ЭНЕРГОЕМКОСТЬ ПРЕССОВАНИЯ

Работа прессования оценивается формулой

$$A = \int_0^{L_n} P(x) dx, \quad (6.1)$$

где $P(x)$ - усилие прессования, изменяющееся по длине хода пресс-штемпеля x ; L_n - длина отпрессованной части слитка, она отличается от длины слитка на величину длины пресс-остатка, которая может достигать до четверти длины слитка.

Обычно известные формулы, применяемые для определения усилия прессования, используются для оценки номинального усилия пресса, необходимого для получения данного вида продукции, поэтому определяется максимальное усилие прессования. Однако в ходе процесса прямого прессования усилие изменяется, т.к. уменьшается площадь поверхности трения в контейнере.

Для нахождения удельной работы прессования A_m разделим правую и левую части формулы (6.1) на массу m , учтем также коэффициент полезного действия η_n , и получим

$$A_m = \frac{A}{m \cdot \eta_n} = \frac{\int_0^{L_n} P(x) dx}{\rho \cdot V \cdot \eta_n}, \quad (6.2)$$

где F - площадь поперечного сечения контейнера.

При обратном прессовании усилие по ходу процесса практически не изменяется, поэтому формула (6.2) может быть записана в более простом виде:

$$A_m = \frac{P}{F \cdot \rho \cdot \eta_n} \quad (6.3)$$

Усилие прессования может быть найдено по одной из известных методик, например, по методике И.Л.Перлина [8,9], в том числе и с применением ЭВМ [10]. По этой методике усилие прессования определяется по формуле

$$P = R_m + T_m + T_n + T_{kp}, \quad (6.4)$$

где R_m - часть усилия, необходимая для осуществления собственно деформации; T_m - часть усилия, необходимая для преодоления сил трения (или

среза) на боковой части обжимающей части очага деформации; T_n - часть усилия, необходимая для преодоления сил трения, возникающей на поверхности калибрующего пояска матрицы; T_{kp} - часть усилия, необходимая для преодоления сил трения на поверхности контейнера, при обратном прессовании $T_{kp}=0$.

Составляющие R_m , T_n , T_m , T_{kp} при прессовании прутка из круглого контейнера определяются по формулам

$$R_m = 0,8 \cdot \ln \lambda \cdot D^2 \cdot \sigma_s / \cos^2(\alpha/2), \quad (6.5)$$

$$T_m = 0,5 \cdot \mu \cdot \ln \lambda \cdot D^2 \cdot \sigma_s / \sin \alpha, \quad (6.6)$$

$$T_n = \lambda \cdot F \cdot \mu_n \cdot \sigma_{sk} / \sqrt{3}, \quad (6.7)$$

$$T_{kp} = \mu_k \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot \sigma_s / \sqrt{3}, \quad (6.8)$$

где D - диаметр контейнера; μ , μ_n , μ_k - коэффициенты трения на матрице, калибрующем пояске и контейнере соответственно, L - длина недеформируемой части заготовки, находящейся в контейнере, определяемая по формуле:

$$L = L_c - 0,5 \cdot (D - d) / \operatorname{tg} \alpha, \quad (6.9)$$

где L_c - длина заготовки в контейнере; α - угол наклона образующей матрицы, при плоской матрице равен углу естественного истечения металла, около 60 градусов, d - диаметр прессуемого прутка.

Величина σ_s является переменной по объему очага деформации: на входе в него металл не упрочнен и его σ_s невелико, а на выходе из отверстия матрицы металл подвергнут деформационному и скоростному упрочнению, поэтому его сопротивление деформации σ_{sk} увеличено. Последнюю величину возможно определить по аппроксимирующей формуле [3]

$$\sigma_{sk} = \frac{a \cdot \varepsilon^m \cdot u^n}{\exp(q \cdot t)} \quad (6.10)$$

где a, m, n, q - эмпирические коэффициенты, значения которых зависят от вида деформируемого материала, для некоторых материалов значения этих коэффициентов представлены в табл.6.1, более подробные данные приведены в статье М.Я.Бровмана [11], ε, u, t - степень, скорость деформации и температура процесса.

Среднее по очагу деформации сопротивление деформации рассчитывается по формуле [3]:

$$\sigma_s = \sigma_{sk} / (1 + m). \quad (6.11)$$

При прессовании скорость деформации u можно оценить по формуле[12]:

$$u = \frac{6 \cdot v \cdot \lambda \cdot \ln \lambda \cdot \operatorname{tg} \alpha}{d \cdot (\lambda \cdot \sqrt{\lambda} - 1)}, \quad (6.12)$$

где v - скорость перемещения пуансона.

Таблица 6.1

Коэффициенты уравнения регрессии для расчета сопротивления деформации

Металл или сплав	Диапазон температур, °С	a , МПа	m	n	q , 1/град
Свинец	20-300	46	0,35	0,12	0,0015
Алюминий	300-550	180	0,37	0,14	0,0017
Медь	450-1000	520	0,40	0,11	0,0023
Цинк	20-100	420	0,15	0,13	0,0012
Титан	200-750	1900	0,35	0,10	0,0030
Сталь Ст3	900-1300	1250	0,25	0,14	0,0025

Из формулы (6.12) в частности следует, что скорость деформации пропорциональна скорости перемещения пуансона, поэтому при больших скоростях прессования следует ожидать более высоких напряжений и усилий, чем при низких скоростях. Таким образом прессование с высокими скоростями приводит к более высоким затратам энергии, чем прессование с низкими скоростями. Однако поддерживать высокие скорости прессования заставляют технолога требования по обеспечению высокой производительности, а также опасность захлаживания металла, в результате чего энергозатраты могут возрасти. Вместе с тем при чрезмерно высокой скорости прессования выделение большого количества тепла деформации может привести к перегреву металла или даже к его расплавлению. Поэтому в каждом конкретном случае выбор скорости деформации является предметом забот технолога.

В формуле (6.10) степень деформации ε авторы работ в области прессования задают различными способами. Так, по методике А.В.Третьякова, В.И.Зюзина [3] эту величину рассчитывают как

$$\varepsilon = \Delta h / h_0 = (h_0 - h_1) / h_0 = 1 - 1 / \lambda = (\lambda - 1) / \lambda, \quad (6.13)$$

где h_0 , h_1 , Δh - высота образца до и после деформации и обжатие образца при прокатке.

По методике А.Хензеля, Т.Шпиттеля [2] рассчитывается логарифмическая степень деформации

$$\varepsilon^0 = \ln \lambda. \quad (6.14)$$

При малых деформациях разница между ε и ε^0 невелика, при больших деформациях, характерных для прессования, поведение функций (6.13) и (6.14) совершенно различно. При вытяжках, стремящихся к бесконечности, формула (6.13) дает значение, равное единице, а формула (6.14) приводит к бесконечно большим значениям. Поскольку формула (6.10) связывает σ_{SK} и ε монотонной зависимостью, то при увеличении степени деформации непрерывно растет и σ_{SK} . Однако известно, что кривые упрочнения отражают рост σ_{SK} в функции от ε до некоторого предела, после которого σ_{SK} не меняется, либо может даже снижаться. При совместном использовании формул (6.10) и (6.14) получаем непрерывный рост σ_{SK} с увеличением λ , что приводит к завышенным оценкам сопротивления деформации при сравнении с опытными кривыми. В связи с изложенным целесообразно оценивать степень деформации при прессовании по формуле (6.13).

Пример 6.1. Оценить энергоемкость процесса обратного прессования круглой стали диаметром 20 мм при температуре 1200°C из заготовки диаметром 45 мм при скорости выхода пресс-изделия 2,1 м/с, коэффициент полезного действия принять 100%.

Определим коэффициент вытяжки $\lambda = (45/20)^2 = 5,06$ и скорость перемещения пуансона $v = 2,1/5,06 = 0,415$ м/с, скорость деформации

$$u = \frac{6 \cdot 415 \cdot 5,06 \cdot \ln 5,06 \cdot \operatorname{tg} 60}{20 \cdot (5,06 \cdot \sqrt{5,06} - 1)} = 170 \text{ с}^{-1}, \quad \text{степень деформации}$$

$\varepsilon = (5,06 - 1) / 5,06 = 0,80$, при $a=1250$ МПа, $m=0,25$; $n=0,14$; $q=0,0025$ град⁻¹; конечное сопротивление деформации равно

$$\sigma_{sk} = \frac{1250 \cdot 0,80^{0,25} \cdot 170^{0,14}}{\exp(0,0025 \cdot 1200)} = 120,8 \text{ МПа, среднее сопротивление деформации}$$

$$\sigma_s = 120,8 / (1 + 0,25) = 96,64 \text{ МПа.}$$

Определим составляющие усилия прессования:

$$R_m = 0,8 \cdot \ln 5,06 \cdot 45^2 \cdot 96,64 / \cos^2(60/2) = 338,4 \text{ кН,}$$

$$T_m = 0,5 \cdot 0,1 \cdot \ln 5,06 \cdot 45^2 \cdot 96,64 / \sin 60 = 18315 \text{ Н} \approx 18,3 \text{ кН,}$$

$$T_n = 5,06 \cdot \pi \cdot 20 \cdot 5 \cdot 0,1 \cdot 120,8 / \sqrt{3} = 11094 \text{ Н} \approx 11,1 \text{ кН}, \quad \text{а также усилие прессования } P = 338,4 + 18,3 + 11,1 = 367,8 \text{ кН.}$$

Удельные энергозатраты составят

$$A_m = \frac{367,8}{\pi \cdot (45^2 / 4) \cdot 7800 \cdot \eta_n} = 29,6 \text{ МДж/т} = 8,23 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т.}$$

Последнее число можно сравнить с показателем, достигнутым в предыдущем примере при сортовой прокатке из заготовки того же размера, и

равным $10,97 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$. Сравнение показывает меньшую энергоёмкость процесса обратного прессования, разница в энергоёмкости составляет $100 \cdot (10,97 - 8,23) / 10,97 = 25 \%$. Разница оказалась бы существенно больше, если бы был учтён разогрев металла при прессовании и связанное с ним падение сопротивления деформации. Уменьшение энергозатрат при прессовании по сравнению с сортовой прокаткой объясняется отсутствием неэффективно затрачиваемой работы на ликвидацию в каждом последующем проходе уширения заготовки в предыдущем проходе.

Задание 6.1. Рассчитать энергоёмкость процесса получения указанного полуфабриката методом обратного прессования. Неуказанные параметры процесса выбрать самостоятельно, пользуясь справочной литературой.

Таблица 6.2

Варианты заданий

Вариант	Материал	Полуфабрикат	Заготовка
1	Латунь Л63	Круг 30мм	Круг 100мм
2	Титан ВТ1	Круг 25мм	Круг 90мм
3	Дюралюминий Д1	Круг 20мм	Круг 60мм
4	Медь М1	Прямоугольник 30х10мм	Круг 60мм
5	Мельхиор МН19	Круг 20мм	Круг 90мм
6	Сталь Ст3	Круг 12мм	Круг 80мм
7	Алюминий А1	Круг 8мм	Круг 30мм
8	Латунь Л63	Круг 30мм	Круг 80мм
9	Титан ВТ1	Круг 25мм	Круг 60мм
10	Дюралюминий Д1	Круг 20мм	Круг 80мм
11	Медь М1	Прямоугольник 20х10мм	Круг 80мм
12	Мельхиор МН19	Круг 20мм	Круг 60мм

7. ЭНЕРГОЕМКОСТЬ ВОЛОЧЕНИЯ

В отличие от прессования при волочении деформирующее усилие прикладывается к переднему концу заготовки, процесс является стационарным. По аналогии с обратным прессованием запишем формулу для оценки энергозатрат в виде

$$A = P \cdot L_{\varepsilon}, \quad (7.1)$$

где P - усилие волочения; L_{ε} - длина протянутой через волоку заготовки без учета длины захватки.

Для нахождения удельной работы волочения A_m разделим правую и левую части формулы (7.1) на массу m , учтем также коэффициент полезного действия η_n , и получим

$$A_m = \frac{A}{m \cdot \eta_n} = \frac{P \cdot L_{\varepsilon}}{\rho \cdot V \cdot \eta_n} = \frac{p}{\rho \cdot \eta_n}, \quad (7.2)$$

где p - напряжение волочения, которое можно оценить, например, по формуле И.Л.Перлина:

$$p = \frac{\bar{\sigma}_s}{\cos^2[(\alpha + \rho)/2]} \cdot \frac{a+1}{a} \cdot \left(1 - \frac{1}{\lambda^a}\right), \quad (7.3)$$

где $a = \cos^2 \rho \cdot (1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha') - 1$; $\rho = \operatorname{arctg} \mu$ - угол трения; α - полуугол волоки (табл.7.1); $\alpha' = \operatorname{arctg} \frac{1}{\operatorname{ctg} \alpha + 2 \cdot l_n / (D - d)}$ - приведенный угол; l_n - длина калибрующего пояска волоки (табл.7.1).

Эти формулы относятся к случаю волочения прутка или проволоки. В других вариантах применения волочения как формообразующей операции (волочение и раздача труб, волочение профилей) следует применять соответствующие формулы для расчета энергосиловых параметров процесса.

Пример 7.1. Оценить энергоемкость волочения проволоки из меди марки М0 от диаметра 3 мм на диаметр 2,6 мм. Принять коэффициент полезного действия равным единице.

Вычислим коэффициент вытяжки $\lambda = (3 / 2,6)^2 = 1,33$ и степень деформации $\varepsilon = 100 \cdot (1,33 - 1) / 1,33 = 25\%$ и определим сопротивление деформации по аппроксимирующей формуле для меди [3,с.135] $\sigma_{sk} = 75 + 56 \cdot \varepsilon^{0,41} = 75 + 56 \cdot 25^{0,41} = 285$ МПа, среднее по очагу деформации сопротивление деформации равно $\sigma_s = (75 + 285) / 2 = 180$ МПа, в

соответствии с табл.7.1 длина калибрующего пояска равна $0,5 \cdot 2,6 = 1,3$ мм, $\alpha = 8^\circ$, $\mu = 0,07$.

Таблица 7.1

Рекомендованные значения параметров волочения при диаметре готовой проволоки 1...3 мм[13]

Параметр	Медь	Цинк	Латунь	Бронза	Никель и его сплавы	Алюминий
Полуугол рабочего конуса волокна α , град	7-9	12-13	7-9	6-8	6-8	-
Длина калибрующего пояска, % к диаметру	50	30	70	70	70	-
Коэффициент трения	0,07	0,11	0,07	0,06	0,08	0,10

Рассчитаем значение приведенного угла $\alpha' = \arctg \frac{1}{ctg 8 + 2 \cdot 1,3 / (3 - 2,6)} = 4,2^\circ$ и угла трения $\rho = \arctg 0,07 = 4,0^\circ$

параметра $a = \cos^2 4,0 \cdot (1 + 0,07 \cdot ctg 4,2) - 1 = 0,944$ и напряжения прессования

$$p = \frac{180}{\cos^2 [(8 + 4,6) / 2]} \cdot \frac{1,076 + 1}{1,076} \cdot \left(1 - \frac{1}{1,33^{1,076}} \right) = 94,8 \text{ МПа.}$$

Тогда удельные энергозатраты составят $A_m = \frac{94,8}{8900} = 10,65 \text{ МДж/т} = 2,96 \text{ кВт ч/т.}$

Как показывают расчеты, энергозатраты при волочении находятся в тесной зависимости от коэффициента трения. Именно поэтому на металлообрабатывающих предприятиях получило широкое распространение волочение в режиме гидродинамического трения (РГТ). Достижимое значительное снижение силы волочения наступает при достижении определенной скорости волочения. Поэтому энергосиловые расчеты при волочении в режиме РГТ следует выполнять в два этапа: для начального периода (при разгоне стана) режим РГТ еще не установился. Поэтому

коэффициенты трения остаются достаточно высокими. Энергозатраты на этом этапе достаточно большие, однако из-за малости времени разгона в целом их влияние на общий уровень энергозатрат невелик. Расчеты на этом этапе приходится выполнять из-за необходимости проверки условия прочности переднего конца заготовки. При наступлении установившейся стадии процесса коэффициент трения значительно снижается, вслед за чем снижаются и энергозатраты.

Идея применения режима РГТ основана на создании при больших скоростях волочения и особом устройстве инструмента толстых смазочных слоев на контактных поверхностях, при этом толщина этих слоев должна превышать высоту микронеровностей на этих поверхностях. Тем самым достигается условие наступления жидкостного трения.

Задание 7.1. Рассчитать энергоемкость процесса получения указанного полуфабриката методом волочения. Неуказанные параметры процесса выбрать самостоятельно, пользуясь справочной литературой.

Таблица 7.2

Варианты заданий

Вариант	Материал	Полуфабрикат	Заготовка
1	Латунь Л63	Круг 3мм	Круг 3,5мм
2	Титан ВТ1	Круг 2,5мм	Круг 2,9мм
3	Дюралюминий Д1	Круг 2,0мм	Круг 2,4мм
4	Медь М1	Круг 10мм	Круг 12мм
5	Мельхиор МН19	Круг 2,0мм	Круг 2,3мм
6	Сталь Ст3	Круг 1,2мм	Круг 1,4мм
7	Алюминий А1	Круг 8мм	Круг 9,3мм
8	Латунь Л63	Круг 3,0мм	Круг 3,5мм
9	Титан ВТ1	Круг 2,5мм	Круг 2,9мм
10	Дюралюминий Д1	Круг 20мм	Круг 23мм
11	Медь М1	Круг 1мм	Круг 1,2 мм
12	Мельхиор МН19	Круг 4,0мм	Круг 4,6мм

8. СРАВНЕНИЕ ПО ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРОЦЕССОВ ГОРЯЧЕЙ И ХОЛОДНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Нагрев заготовок перед деформацией применяется для повышения пластичности металла и снижения сопротивления деформации; последнее приводит к понижению напряжений, усилий, моментов, мощностей деформации. Но приводит ли такой прием к уменьшению необходимых энергозатрат на процесс в целом могут показать только расчеты. Действительно, общая энергия, необходимая для осуществления процесса

горячей деформации A_2 , складывается из энергии, необходимой для нагрева заготовки Q , и энергии, необходимой для собственно деформации A_d :

$$A_2 = A_d + Q \quad (8.1)$$

Для осуществления холодной деформации необходимо затратить только энергию на собственно деформацию A_x , но эта энергия окажется заведомо больше, чем энергия A_2 , т.к. металл используется в более прочном состоянии, но эта энергия может оказаться меньше, чем сумма, стоящая в правой части уравнения (8.1).

Пример 8.1. Оценить, какой процесс окажется более рациональным с точки зрения энергозатрат: горячее обратное прессование заготовки из алюминия диаметром 20мм при температуре 400°С из заготовки диаметром 100 мм при скорости выхода пресс-изделия 2,1м/с, или холодное обратное прессование той же заготовки, коэффициент полезного действия нагрева принять 50 %.

Определим среднюю теплоемкость алюминия в интервале температур 0...400°С: $c=(0,896+0,980)/2=0,938$ кДж/(кг*град). Рассчитаем энергоемкость нагрева

$Q_m = c \cdot (t_1 - t_2) = 0,938 \cdot 400 = 372,2$ кДж / кг = 375,2 МДж / т, а с учетом коэффициента полезного действия нагрева $2 \cdot 375,2 = 750,4$ МДж/т.

Определим коэффициент вытяжки $\lambda = (100 / 20)^2 = 25$ и скорость перемещения пуансона $v = 2,1 / 25 = 0,084$ м / с, скорость деформации $u = \frac{6 \cdot 84 \cdot 25 \cdot \ln 25 \cdot \operatorname{tg} 60}{20 \cdot (25 \cdot \sqrt{25} - 1)} = 28,3 \text{ с}^{-1}$, степень деформации $\varepsilon = (25 - 1) / 25 = 0,96$, по кривым упрочнения определим начальное сопротивление деформации 34 МПа, конечное сопротивление деформации 50 МПа, среднее сопротивление деформации 42 МПа.

Определим составляющие усилия прессования:

$$R_m = 0,8 \cdot \ln 25 \cdot 100^2 \cdot 42 / \cos^2 (60 / 2) = 1443 \text{ кН},$$

$$T_m = 0,5 \cdot 0,3 \cdot \ln 25 \cdot 100^2 \cdot 42 / \sin 60 = 235 \text{ кН},$$

$$T_n = 25 \cdot \pi \cdot 20 \cdot 10 \cdot 0,3 \cdot 50 / \sqrt{3} = 136 \text{ кН}, \quad \text{а также усилие прессования } P = 1443 + 235 + 136 = 1814 \text{ кН}.$$

Удельные энергозатраты на процесс прессования составят

$$A_m = \frac{2095}{\pi \cdot (100^2 / 4) \cdot 2700 \cdot \eta_n} = 85 \text{ МДж / т} = 23,8 \text{ кВт ч/т}.$$

Общие затраты на процесс горячей деформации: $750,4 + 85,0 = 835,4$ МДж/т или $232,0$ кВт*ч/т.

Для расчета энергоемкости холодного прессования определим по кривым упрочнения сопротивление деформации алюминия марки АД в холодном состоянии: начальное 120МПа, конечное 200МПа, среднее по очагу деформации сопротивление деформации равно $(120+200)/2=160$ МПа. Составляющие усилия прессования

$$R_m = 0,8 \cdot \ln 25 \cdot 100^2 \cdot 160 / \cos^2(60/2) = 3594 \text{ кН},$$

$$T_m = 0,5 \cdot 0,3 \cdot \ln 25 \cdot 100^2 \cdot 160 / \sin 60 = 894 \text{ кН},$$

а также усилие прессования $P=3594+894+942=5430$ кН.

Удельные энергозатраты на процесс прессования составят

$$A_m = \frac{5430}{\pi \cdot (100^2 / 4) \cdot 2700 \cdot \eta_n} = 255 \text{ МДж/т} = 70,8 \text{ кВт*ч/т}.$$

Эти затраты на $100 \cdot (232,0 - 70,8) / 232,0 = 69\%$ меньше, чем при горячем прессовании. Таким образом холодная деформация является энергетически более выгодным процессом, чем горячая.

Задание 8.1. Сравнить энергозатраты при горячем и холодном прессовании заготовок в указанных условиях обработки. Неуказанные параметры выбрать по справочной литературе.

Таблица 8.1

Варианты заданий

Вариант	Материал	Полуфабрикат	Температура горячей обработки, °С	Заготовка
1	Латунь Л63	Круг 30мм	750	Круг 100мм
2	Титан ВТ1	Круг 25мм	900	Круг 90мм
3	Дюралюминий Д1	Круг 20мм	420	Круг 60мм
4	Медь М1	Прямоугольник 30x10мм	850	Круг 60мм
5	Мельхиор МН19	Круг 20мм	900	Круг 90мм
6	Сталь Ст3	Круг 12мм	1100	Круг 80мм
7	Алюминий А1	Круг 8мм	450	Круг 30мм
8	Латунь Л63	Круг 30мм	750	Круг 80мм
9	Титан ВТ	Круг 25мм	1000	Круг 60мм
10	Дюралюминий Д1	Круг 20мм	450	Круг 80мм
11	Медь М1	Прямоугольник 20x10мм	850	Круг 80мм
12	Мельхиор МН19	Круг 20мм	950	Круг 60мм

9. ЭНЕРГОЕМКОСТЬ УПЛОТНЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ ЗАГОТОВОК

При уплотнении порошков в жесткой прессформе энергия тратится на преодоление внутреннего и внешнего трения. Технологические свойства порошков характеризуются уплотняемостью и формуемостью. Уплотняемость определяется в опыте сжатия порошка в жесткой прессформе и характеризуется графиком зависимости плотности ρ от напряжения сжатия σ :

$$\rho = f(\sigma). \quad (9.1)$$

Работа уплотнения порошка переменной при нагружении силой P может быть описана формулой

$$A = \int_{h_0}^{h_1} P(h) dh, \quad (9.2)$$

где h , h_0 и h_1 - соответственно текущая, начальная и конечная высота заготовки.

Оценим удельные энергозатраты A_m , для чего разделим правую и левую части равенства (9.2) на массу m , учтем коэффициент полезного действия процесса η и получим:

$$\begin{aligned} A_m &= \frac{1}{m \cdot \eta} \cdot \int_{h_0}^{h_1} P(h) dh = \int_{h_0}^{h_1} \frac{P(h) \cdot dh}{\rho(h) \cdot F \cdot h \cdot \eta} = \\ &= \frac{1}{\eta} \cdot \int_{h_0}^{h_1} \frac{\sigma(h)}{\rho(h)} \frac{dh}{h} = \frac{1}{\eta} \cdot \int_{\rho_0}^{\rho_1} \frac{\sigma(\rho)}{\rho(h)} \frac{d\rho}{\rho}, \end{aligned} \quad (9.3)$$

т.е. для определения затрат необходимо воспользоваться кривой уплотнения в графическом, аналитическом или табличном виде. Такую кривую снимают при испытании конкретного материала в соответствии с требованиями ГОСТ 25280. Если кривая уплотнения задана в аналитическом виде, т.е. в виде формулы, то по формуле (9.3) возможно взять интеграл и производить расчеты удастся в явном виде.

При задании кривой уплотнения в табличном виде формулу (9.3) удобнее представить в конечно-разностной форме:

$$A_m = \frac{1}{\eta} \cdot \int_{\rho_0}^{\rho_1} \frac{\sigma(\rho)}{\rho(h)} \frac{d\rho}{\rho} = \frac{1}{\eta} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_i - \sigma_{i-1}}{(\rho_i + \rho_{i-1})/2} \cdot \frac{\rho_i - \rho_{i-1}}{(\rho_i + \rho_{i-1})/2} \quad (9.4)$$

В табл.9.2 представлены характеристики кривой уплотнения для некоторых материалов.

Таблица 9.1

Зависимость плотности от давления прессования [14]

Порошок	Плотность (г/см ³)/относительная плотность (%) при давлении прессования, МПа								
	0	100	200	300	400	500	600	700	800
Алюминий АПС1	<u>0,70</u> 25,9	<u>2,32</u> 86,1	<u>2,57</u> 95,1	<u>2,62</u> 97,3	<u>2,63</u> 97,5	<u>2,63</u> 97,5	<u>2,63</u> 97,5	<u>2,64</u> 97,9	
Железо ПЖ2М1	<u>2,10</u> 26,9	<u>4,02</u> 51,2	<u>4,66</u> 59,4	<u>5,28</u> 67,3	<u>5,59</u> 71,2	<u>5,94</u> 75,6	<u>6,20</u> 79,0	<u>6,37</u> 81,1	<u>6,44</u> 82,0
Медь МП1	<u>2,50</u> 28,0	<u>5,00</u> 56,2	<u>5,65</u> 63,6	<u>6,30</u> 70,8	<u>6,74</u> 75,7	<u>7,06</u> 79,5	<u>7,38</u> 83,0	<u>7,53</u> 84,6	
Титан ТГ100	<u>1,10</u> 25,0	<u>2,48</u> 55,1	<u>3,16</u> 70,3	<u>3,48</u> 76,5	<u>3,52</u> 78,1	<u>3,61</u> 80,1	<u>3,75</u> 83,4	<u>3,90</u> 86,7	<u>3,93</u> 87,5
Серебро ПС-2	<u>2,50</u> 23,8	<u>7,48</u> 71,2	<u>8,43</u> 80,4	<u>8,67</u> 82,7	<u>8,94</u> 85,2	<u>9,25</u> 88,3			
Свинец С1	<u>5,50</u> 48,5	<u>10,8</u> 95,1	<u>11,2</u> 98,7	<u>11,2</u> 98,7					

Пример 9.1. Рассчитать энергоёмкость уплотнения железного порошка до плотности 5,28 г/см³ в жесткой прессформе, коэффициент полезного действия принять равным 0,9.

Рассчитаем энергозатраты с использованием данных табл.9.1, для чего разобьем процесс деформации на ряд ступеней и оценим затраты на каждой ступени, учтем, что по ступеням прирост напряжений одинаков:

$$A_m = \frac{1}{\eta} \cdot (\sigma_i - \sigma_{i-1}) \cdot 4 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i - \rho_{i-1}}{(\rho_i + \rho_{i-1})^2} = \frac{1}{0,9} \cdot 100 \cdot$$

$$\cdot 4 \cdot \left[\frac{4,02 - 2,10}{(4,02 + 2,10)^2} + \frac{4,66 - 4,02}{(4,66 + 4,02)^2} + \frac{5,28 - 4,66}{(5,28 + 4,66)^2} \right] =$$

$$= 444 \cdot (0,0513 + 0,0085 + 0,0063) = 29,3 \text{ МДж/т}$$

Следует отметить, что указанная методика расчета является приближенной, поскольку не учитывает два явления, сопровождающие процесс уплотнения:

- трение на стенках пресс-формы, увеличивающее энергозатраты;
- «анизотропию» передачи давления в твердых телах; в отличие от жидкости порошок передает на стенки пресс-формы только часть давления, что учитывается в формулах введением понятия коэффициента бокового давления.

Задание 9.1. Рассчитать энергозатраты при холодном уплотнении до заданной плотности указанного порошка в жесткой прессформе.

Таблица 9.2

Варианты заданий

Вариант	Порошок	Плотность, г/см ³	η
1	Алюминий	2,6	0,9
2	Железо	7,0	0,8
3	Титан	3,7	0,7
4	Медь М1	6,7	0,6
5	Серебро	8,9	0,9
6	Свинец	11,2	0,8
7	Алюминий	2,5	0,7
8	Железо	6,5	0,6
9	Титан	3,5	0,9
10	Медь М1	6,0	0,8
11	Серебро	8,0	0,7
12	Свинец	8,0	0,6

10. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ СОВМЕЩЕНИИ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ

Прогрессивным направлением, позволяющим снизить энергозатраты в металлообработке, является совмещение процессов литья и деформации [28-30]. Тепло литейного передела в этом случае используется для придания нужных свойств металлу в процессе обработки давлением. Известны следующие технологические схемы совмещения процессов:

- литье - плоская прокатка;
- литье - сортовая прокатка;
- литье-прессование.

Первая схема нашла довольно широкое применение при производстве листовой продукции из алюминиевых сплавов. Вторая схема - при производстве катанки и мелкого сорта из меди и ее сплавов. В табл.10.1 приведены данные по снижению энергетических затрат при замене традиционной схемы на совмещенную. Результатом такой замены является экономия около 1 тыс. кВт*ч на тонну проката.

Таблица 10.1

Расход энергии на производство медной катанки диаметром 8 мм
по двум технологическим схемам[17]

Операции	Расход энергии, кВт*ч/т
<u>Технология А</u>	
1. Плавка и разливка на вайербарсы или непрерывное литье	1307
2. Нагрев заготовок в методической печи	309
3. Прокатка с адьюстажем	124
ИТОГО	1740
<u>Технология Б</u>	
1. Подогрев анодов перед плавкой	144
2. Плавка и разливка	462
3. Прокатка с адьюстажем	39
ИТОГО	645

В [17] приведены данные расчета энергозатрат при производстве полуфабрикатов из алюминия (табл.10.2).

Таблица 10.2

Энергозатраты при производстве алюминиевых полуфабрикатов по различным технологическим схемам

Статья затрат или оборудование	Затраты, кВт*ч/т
Совмещенный агрегат непрерывного литья и прокатки катанки	60
Волоочильный стан	18
ИТОГО по совмещенной схеме литье-прокатка-волочение	78
Нагрев слитка в индукторе	280
Прессование	110
ИТОГО по схеме нагрев-прессование	390
Нагрев в методической печи	470
Горячая плоская прокатка, в том числе черновая группа клетей	112 48
чистовая группа клетей	64
Холодная листовая прокатка	180
Отжиг полосы	335
ИТОГО по схеме нагрев-прокатка-отжиг	1095

В работе [17], в частности отмечается, что в зависимости от способа обработки металлов давлением и марки материала на нагрев затрачивается 50-

85% всего расхода энергии, а сам нагрев осуществляется с весьма низким КПД (30-40%), поэтому, чтобы достичь весомой экономии энергии необходимо:

- наиболее полно использовать тепло деформируемого материала с предыдущих стадий технологического процесса, для чего совершенствовать организацию процесса и соблюдать технологическую дисциплину;
- стремиться избегать энергоемких стадий технологического процесса;
- уменьшать количество не утилизированных вторичных энергоресурсов, используя их для предварительного подогрева воздуха, топлива, самого деформируемого материала, горячей воды, пара;
- применять такие способы обработки и режимы технологических процессов, в которых удельный расход энергии на деформацию невелик.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Советкин В.Л. Теплофизические свойства веществ /Учебное пособие/ В.Л.Советкин, Л.А.Федяева. Свердловск: УПИ, 1990. 104 с.
2. Хензель А. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением/ А.Хензель, Т.Шпиттель. М.: Металлургия, 1982. 360 с.
3. Теория прокатки /Справочник /А.И.Целиков [и др.] М.: Металлургия, 1982. 335 с.
4. Целиков А.И. Теория продольной прокатки /А.И.Целиков, Г.С.Никитин, С.Е.Рокотян. М.: Металлургия, 1980. 320 с.
5. Смирнов В.К. Деформации и усилия в калибрах простой формы /В.К.Смирнов, В.А.Шилов, К.И.Литвинов. М.: Металлургия, 1982. 144 с.
6. Смирнов В.К. Калибровка прокатных валков/ В.К.Смирнов, В.А.Шилов, Ю.В.Инатович. М.: Металлургия, 1987. 368 с.
7. Прокатное производство/ П.И.Полухин [и др.] М.: Металлургия, 1982. 696 с.
8. Перлин И.Л. Теория прессования металлов. И.Л.Перлин, Л.Х.Райтбарг. М.: Металлургия, 1975. 448 с.
9. Буркин С.П. Особенности прессования специальных сплавов/Учебное пособие/С.П.Буркин. Свердловск: изд.УПИ, 1985. 97 с.
10. Логинов Ю.Н. Анализ на ЭВМ параметров прессования: Методические указания / Ю.Н.Логинов, С.П.Буркин. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1994. 36 с.
11. Бровман М.Я. Сопротивление деформации в процессах обработки давлением при высоких температурах/ М.Я.Бровман // Технология легких сплавов, 1979, N8. С.26-30.
12. Полухин П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов/ П.И.Полухин, Г.Я.Гун, А.М.Галкин. М.: Металлургия, 1983. 352 с.
13. Брабец В.И. Проволока из тяжелых цветных металлов и сплавов (производство, свойства, применение)/В.И.Брабец. М.: Металлургия, 1984. 296 с.
14. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: Справочник// И.М.Федорченко[и др.]. Киев: Наукова думка, 1985. 624 с.
15. Справочник по обработке цветных металлов и сплавов /под ред. Л.Е.Миллера. М.: Металлургиздат, 1961. 872с.
16. Соколов К.Н. Технология термической обработки и проектирования термических цехов/ К.Н.Соколов, И.К.Коротич. М.: Металлургия, 1988. 384 с.
17. Оптимизация расхода энергии в процессах деформации/ А.Хензель [и др.]. М.: Металлургия, 1985. 184 с.
18. Буркин С.П., Логинов Ю.Н. Технология прессования специальных сплавов. Вопросы и задачи. Свердловск: УПИ. 1991. 35 с.
19. Логинов Ю.Н. Сравнение энергоемкости процессов упрочнения алюминиевых сплавов термической обработкой и пластической деформацией/

- Ю.Н.Логинов, С.П.Буркин, В.В.Сапунжи. Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов. Екатеринбург, 2000. С.186.
20. Головин В.А. Листы и ленты из тяжелых цветных металлов/ В.А.Головин, Г.Н.Кручер. М.: Металлургия, 1985. 384 с.
21. Логинов Ю.Н. Технология производства заготовок из твердых сплавов: Учебное пособие/Ю.Н.Логинов. Свердловск, УПИ. 1984. 53 с.
22. Кипарисов С.С. Порошковая металлургия/ С.С.Кипарисов, Г.А.Либенсон М.: Металлургия, 1980. 496 с.
23. Королев А.А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов/А.А.Королев. М.: Металлургия, 1985. 376 с.
24. Меерович И.М. Прокатка плит и листов из легких сплавов/ И.М.Меерович. М.: Металлургия, 1969. 252 с.
25. Колпашников А.И. Прокатка листов из легких сплавов/А.И.Колпашников. М.: Металлургия, 1979. 264 с.
26. Логинов Ю.Н. Энергосбережение в процессах прессования Ю.Н.Логинов, С.П.Буркин// Цветные металлы. 2002, №7. С.81-87.
27. Логинов Ю.Н. Анализ энергозатрат при горячей прокатке листовых полуфабрикатов из алюминия/Ю.Н.Логинов// Производство проката. 2005, №4. С.19-24.
28. Буркин С.П. Непрерывное прессование заготовок через разъемный контейнер/С.П.Буркин, Ю.Н.Логинов// Известия вузов. Черная металлургия. 1997. №10. С.40-45.
29. Буркин С.П. Технологический вариант полунепрерывного прессования крупногабаритных заготовок. С.П.Буркин, Ю.Н.Логинов, С.М.Волков. //Непрерывные процессы обработки давлением. М.: МГТУ, 2004. С.99-105.
30. Буркин С.П. Энергосберегающая схема производства шаров совмещенным процессом литья-деформации /С.П.Буркин, Ю.Н.Логинов, Г.В.Миронов// Сталь. 2000. №9. С. 35-39.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Удельный расход энергии при переплаве 1 т шихты[15]

Материал	Характеристика шихты	Температура литья, °С	Теоретический расход на расплавление и перегрев , кВт*ч/т	Практический удельный расход энергии, кВт*ч/т	КПД печи, %
Алюминий	Слитки	750	331	480	69
	Обрезь	750	331	550	60
ЛатуньЛ63	Слитки	1100	186	220	84
	Обрезь	1100	186	240	77
Медь	Слитки	1170	199	330	60
Мельхиор	Смесь	1360	230	395	58
Бронза оловянистая	Смесь	1260	198	280	70
Бронза алюминиевая	Смесь	1150	212	330	64
Монель-металл НМЖМц28-2,5-1,5	Смесь	1500	293	400	73
Никель	Обрезь	1600	326	500	65
Нихром	Слитки	1500	330	500	66
Цинк	Слитки	475	97	120	80

Приложение 2

Ориентировочные нормы трудоемкости, расхода металла и энергетических затрат на 1т катанки на проволочно-прокатном стане[13]

Материал	Потери, %		Выход годного %	Запр. коэф ф	Трудоемкость		Расход электро энергии и кВтч/т	Расход	
	гео- метр. отход	угар и ока- лина			станко- ч/т	чел-ч/т		мазут кг/т	при р. газ м ³ /т
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Медь	0,5	0,4	99,1	1010	0,05	2,2	70	38	38
Латунь	4,2	0,3	95,5	1047	0,24	5,76	100	38	40
Бронза	5,8	0,3	93,9	1065	0,29	6,96	150	95	105
Никелевые сплавы	9,8	0,5	89,7	1115	0,48	11,52	207	230	225
Термоэлек- тродные сплавы	14,6	0,5	84,9	1178	0,67	16,1	335	245	245
Медноник- елевые сплавы	11,3	0,6	88,1	1135	0,4	9,6	207	230	225

Примечание. В среднем для всех сплавов расход воды 40 м³/т, расход пара 2388 кДж/т.

Ориентировочные расходы топлива и КПД термических печей[16]

Тип печи для нагрева	Рабочая температу ра, °С	Пламенные печи			Электрические печи		
		кДж/кг	в ус- ловном, %	КПД	кВт*ч/т	в ус- ловном, %	КПД
Отпуск							
Камерная	550	1600	5,7	18	140	1,7	60
Конвей- ерная	550	1260	4,5	25	110	1,5	75
Закалка, нормализация							
Камерная	850	3150	11,0	18	320	4,0	50
Толка- тельная	850	2100	7,0	28	220	2,7	70
Толкатель ная с поддонам и	850	3570	12,0	16	350	4,3	45
Конвей- ерная	850	2350	8,0	24	245	3,0	65
Ролико- вая	850	2100	7,0	27	220	2,7	70
Кару- сельная	850	1900	6,5	30	210	2,5	75
Соляная ванна	800	3350	11,0	15	250	3,0	60
Отжиг							
Камерная	900	3570	12,0	16	450	5,5	40
Камерная с выдвиж- ным подом	900	2850	10,0	20	360	4,5	50
Туннель- ная	900	2400	8,0	25	300	3,5	60
Ролико- вая для листов	850	1600	6,0	33	-	-	-
Элева- торная	900	-	-	-	300	3,5	60
Цементация (газовая)							
Толка- тельная	930	2900	10,0	22	400	5,5	40
Шахтная	930	-	-	-	600	7,5	30
Патенти- рование	1000	3570	12,0	20	-	-	-

Приложение 4

Удельный расход энергии на деформацию в процессахковки и прокатки [17]

Агрегат	Сечение заготовки, мм	Температура, °С	Расход энергии, кВт*ч/т
Восьмибойковая вальцековочная машина	80x80	1000	11,0
Четырехбойковая ковочная машина		950	8,2
Непрерывный проволочный стан	108x108	1060	2,8
Полунепрерывный мелкосортный стан	120x120	930	5,0

Приложение 5

Отношение K фактического удельного расхода энергии на деформацию к теоретическому при различных способах обработки давлением

Процесс обработки давлением	K
Прокатка блюмов и слябов	1,60-2,10
Прокатка толстых листов	1,50-2,30
Горячая прокатка листов и полос	1,70-2,20
Холодная прокатка листов и полос	1,80-2,10
Прокатка заготовки	2,20-2,60
Прокатка сортовых профилей	2,10-2,60
Прокатка мелкого сорта и катанки	2,40-2,70
Производство труб поперечно-винтовой прокаткой	1,60-2,70
Производство труб прошивкой на прессе	2,30-2,70
Производство труб прокаткой на оправке автоматстана	2,20-2,80
Производство труб горячей пилигримовой прокаткой	2,10-3,30
Производство труб на реечном стане	3,30-4,00
Производство труб на редукионных и редукионно-растяжных станах	2,10-3,30
Производство труб на станах ХПТ	2,20-3,10
Производство труб холодным волочением	2,20-2,70
Прессование профилей	2,00-3,20
Свободная ковка	2,40-3,30
Волочение прутков и профилей	1,70-2,50
Волочение проволоки	1,60-2,40

Юрий Николаевич Логинов
Сергей Павлович Буркин

Энергоемкость и энергосбережение в процессах пластической обработки
специальных сплавов

Редактор *И.Г.Южакова*

Компьютерный набор *Ю.Н.Логинова*

ИД №06263 от 12.11.2001 г.

Подписано в печать 28.03.06

Бумага писчая

Усл.печ. л. 2,5

Заказ 52

Уч.-изд.л. 2,6

Формат 60x84 1/16

Печать плоская

Тираж 50

Цена «С»

Редакционно-издательский отдел ГОУ ВПО УГТУ-УПИ
620002, Екатеринбург, ул. Мира. 19

Ризография НИЧ ГОУ ВПО УГТУ-УПИ
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19

Ю.Н. Логинов С.П. Буркин

**ЭНЕРГОЕМКОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ
В ПРОЦЕССАХ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
СПЕЦИАЛЬНЫХ СПЛАВОВ**